

ВЛИЯНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ И ИЗМЕНЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИМАТА ВЫСОКИХ И УМЕРЕННЫХ ШИРОТ

Г.В. Алексеев, Р.Ю. Лукьянова, Н.Е. Иванов

INFLUENCE OF FLUCTUATIONS AND CHANGES IN SOLAR ACTIVITY ON THE CLIMATE CHARACTERISTICS AT HIGH AND MIDDLE LATITUDES

G.V. Alekseev, R.Yu. Lukianova, N.E. Ivanov

Рассматриваются статистические соотношения между короткопериодными флуктуациями солнечной активности (СА) и колебаниями приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры воды на поверхности океана (ТПО), оценивается вклад изменений СА в межгодовые и междекадные изменения ПТВ и ТПО. Анализ изменчивости характеристик СА и климата выполнен с использованием ранговых и квантильных статистик и методов корреляционного и спектрального анализа временных рядов. Показано, что в Северном полушарии период повышенной температуры и наибольшее число теплых месяцев большей частью (до 80 % от общего числа сравнений) приходится на годы с максимальными положительными аномалиями общего солнечного излучения. Между рядами среднегодовых значений геомагнитного *aa*-индекса и ПТВ/ТПО, осредненных глобально и по полушарию, существует корреляция с коэффициентами в пределах 0.5–0.6 с запаздыванием изменений температуры относительно *aa*-индекса в пределах 3–14 лет. После сглаживания скользящим 11-летним средним коэффициенты корреляции между рядами *aa*-индекса и температуры возрастают до 0.87–0.89, а запаздывание составляет 8 лет. Связь отражает более 50 (40) % изменчивости ПТВ (ТПО). Если принимать во внимание запаздывание ПТВ и ТПО относительно изменений СА при высокой корреляции между ними, то установленные зависимости могут описывать значительную часть изменений средних значений ПТВ и ТПО.

Statistical relationship between the short-period fluctuations in solar activity (SA) and the fluctuations in the near-surface air temperature (SAT) and the water temperature at the ocean surface (SST) is considered. The contribution of SA to the interannual and interdecadal changes of SAT and SST is assessed. Analysis of the variability of the SA and climate characteristics is made using the rank and quantile statistics as well as the methods of correlation and spectral analysis. It is shown that the enhanced temperature and the largest number of warm months in the northern hemisphere are mainly (up to 80 % of the total number of comparisons) observed in the years of the maximum short-period positive anomalies of total solar radiation. The correlation coefficient between the time series of the annual values of the geomagnetic *aa*-index and SAT/SST averaged globally and over the hemisphere is in the range of 0.5–0.6 with a time lag of temperature changes (relative to the *aa*-index) in the range of 3–14 yr. After the smoothing by the running 11-yr average, the correlation coefficients increase up to 0.87–0.89 with the 8-yr lag. The relationship obtained explains more than 50 (40) % of the SAT (SST) variability. Taking account of the time lag between SAT and SST relative to SA and a high correlation, we may conclude that the established relationship may describe a significant part of the SAT and SST variability.

Введение

Неравномерность наблюдаемого в последние три десятилетия потепления климата обычно объясняют внутренней изменчивостью в климатической системе. Однако климатическая система подвергается и внешним воздействиям, связанным с процессами на Солнце, которые могут быть причиной части колебаний климата. Проблема заключается в оценке этой части. В отчете IPCC [The Physical Science Basis, 2007] отмечается, что необходимо проводить больше исследований влияния солнечной активности (СА) на климат, прежде чем степень этого влияния может быть надежно установлена. В настоящее время оценки этого влияния отличаются у разных авторов весьма значительно. Так, например, в работе [Scafetta, West, 2006] показано, что 45–50 % глобального потепления в 1900–2000 и 25–35 % в 1980–2000 гг. обусловлены изменением СА, а в работе [Soon, 2005] утверждается, что до 75 % междесятилетней изменчивости среднегодовой температуры в Арктике обусловлено влиянием Солнца. Большинство же авторов оценивают вклад СА значительно меньшей величиной. В отчете IPCC [The Physical Science Basis, 2007] принято, что изменение глобального радиационного форсинга за период потепления с 1750 г. составляет 0.12 Вт/м^2 , что по сравнению с антропогенным изменением форсинга 1.60 Вт/м^2 составляет менее 8 %. Однако в недавнем обзоре влияния СА на климат [Gray et al., 2010] пока-

зано, что величина 0.24 Вт/м^2 более приемлема для оценки естественного изменения радиационного форсинга за этот период.

Среди механизмов воздействия СА рассматриваются как прямое влияние СА на тепловой баланс Земли, так и косвенные воздействия, связанные, например, с влиянием УФ-радиации на химические процессы в верхней атмосфере или с влиянием галактических космических лучей на облачность [Gray et al., 2010]. Недавно на основе данных спутниковых измерений появилось предположение о возможном влиянии на климат нестабильности спектрального состава солнечного излучения [Harder et al., 2009]. Оказалось, что уменьшение излучения в коротковолновой части спектра в 2004–2007 гг. компенсировалось его ростом в длинноволновой части. Однако авторы работы [Lean, de Land, 2012] считают, что этот эффект может быть вызван дрейфом чувствительности прибора, а не изменениями в спектре излучения.

Большинство исследований влияния СА на климат имеют дело с масштабами 11 лет и более. В частности, обнаружено ее влияние на изменения температуры верхнего слоя океана с масштабом 11 и 70–80 лет при запаздывании в 1–2 года [Gray et al., 2010]. Оценки временных масштабов изменений СА, в наибольшей степени влияющих на климат, также различаются у разных авторов. Так, авторы работы [Cubbish et al., 2006] считают, что темпера-

турный отклик климатической системы на относительно короткие вариации солнечного воздействия может достигать 2 К, но без сколько-нибудь заметного длительного эффекта. В работе [Lovejoy, Schertzer, 2012] подтверждается уменьшение влияния СА с увеличением временного масштаба, но при этом отмечается, что большинство палеореконструкций указывают на усиление с ростом масштаба. Авторы работы [Love et al., 2011] предполагают, что влияние солнечно-земного взаимодействия на современные изменения климата полностью содержится в долговременных трендах.

Короткопериодным воздействиям СА и их кумулятивному эффекту уделялось меньше внимания. В данной работе рассматривается влияние таких флуктуаций СА на колебания приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры воды на поверхности океана (ТПО), а также оценивается вклад более долгопериодных изменений СА в межгодовые и междекадные изменения ПТВ и ТПО.

Данные и метод исследования

Ежедневные значения полного солнечного излучения (TSI) за 1979–2011 гг. взяты на сайтах [<http://www.pmodwrc.ch> и <http://www.acrim.com>]. Ежемесячные значения геомагнитного *aa*-индекса за 1868–2011 гг. получены с сайта [http://isgi.cetp.ipsl.fr/des_aa.htm]. Данные о ПТВ представлены среднемесячными значениями температуры из массива NCEP за 1948–2011 гг., среднемесячными значениями температуры, полученными на 30 метеорологических станциях за 1900–2011 гг. и на 81 станции за 1950–2011 гг. к северу от 60° N, а также средними значениями ПТВ в Северном полушарии за 1850–2011 гг. [<http://www.cru.uea.ac.uk/>]. Среднемесячные значения ТПО взяты из массива HadSST за 1870–2003 гг. и массива PMEO за 1950–2011 гг. [<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/>, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>].

Анализ изменчивости характеристик СА и характеристик климата выполнен с использованием ранговых и квантильных статистик и методов корреляционного и спектрального анализа временных рядов.

Соотношение между флуктуациями суточных значений TSI и аномалиями средней температуры воздуха

По данным прямых измерений приток энергии от Солнца на верхнюю границу атмосферы (TSI) испытывает сильные флуктуации от дня ко дню, от месяца к месяцу и от года к году. Сглаживание этих флуктуаций оставляет междекадные (11-летние) колебания амплитудой около 0.1 % и слабый тренд на понижение от 1979 к 2009 г., который зависит от метода обработки данных прямых измерений. Анализ изменчивости TSI за период измерений с 1978 по 1979 г. показывает, помимо 11-летнего цикла, значительные межсуточные флуктуации амплитудой более 0.1 %, т. е. $>1 \text{ Вт/м}^2$, усиливающиеся на максимумах солнечного цикла (рис. 1, *а*). На спектре ежемесячных значений TSI отражается подавляющий вклад 11-летнего колебания и заметен вклад годового колебания, которому соответствует основной максимум на спектре аномалий относи-

тельно 11-летнего цикла (рис. 1, *б*). Помимо общего усиления на максимумах солнечного цикла, увеличение амплитуды положительных аномалий TSI попадает на разные сезоны года (рис. 1, *в*). Так, в 1990 г. они были максимальными в середине года, а в 2000 г. – в последние-первые месяцы года. Соответственно можно ожидать, что их влияние заметнее в 1990 г. в Северном полушарии, а в 2000 г. – в Южном.

Чтобы обнаружить влияние флуктуаций TSI в температуре воздуха, сравним распределения больших положительных аномалий TSI и больших положительных аномалий температуры воздуха в Северном полушарии. В качестве индекса больших положительных аномалий TSI используем средний за год или сезон ранг ежедневных значений TSI за 1979–2008 гг.:

$$R_g = \frac{1}{365} \sum_d R_{dg}, \quad (1)$$

где R_{dg} – ранг, который определяется для каждого дня по значениям TSI в этот день во все годы. При этом соответствующий 30-летний вариационный ряд начинается с минимального значения TSI, обозначаемого как 1, а наибольший ранг, равный 30, соответствует максимальной положительной флуктуации TSI. Осреднение за год ежедневных рангов дает индекс, большие значения которого соответствуют году с большим числом значительных положительных суточных аномалий TSI.

На рис. 2, *а* приведены распределения средних за год рангов ежедневных значений TSI (отклонения от 11-летнего цикла), распределение средних рангов среднемесячной температуры воздуха в Северном полушарии (рис. 2, *б*) и числа наиболее теплых месяцев в высоких широтах (рис. 2, *в*, *г*). Основная часть (80 %) больших значений в распределении рангов температуры (превышающих значение 30) отмечается в те же годы, что и большие значения среднегодовых рангов TSI (превышающие 15). Это означает, что самые теплые периоды в Северном полушарии в значительной части приходятся на годы с максимальными положительными суточными аномалиями TSI.

Такое же сравнение распределений рангов TSI с распределением числа наиболее теплых (положительные аномалии выше 95 % уровня) месяцев в высоких широтах Северного полушария показывает, что наибольшее число теплых месяцев (превышающее 40 и 15 соответственно) отмечается в годы, соответствующие максимальным положительным среднегодовым рангам TSI (рис. 2, *в*, *г*). Подсчет показывает высокую повторяемость совпадений (более 70 %) между годами с большими значениями индекса TSI и годами с большими положительными аномалиями ПТВ в высоких широтах. Это число намного превышает возможное число случайных совпадений. Вероятность случайного совпадения определим по схеме опыта с двумя урнами с одинаковым числом шаров (годы) и определенным количеством помеченных шаров, соответствующих большим значениям индекса TSI и аномалий ПТВ:

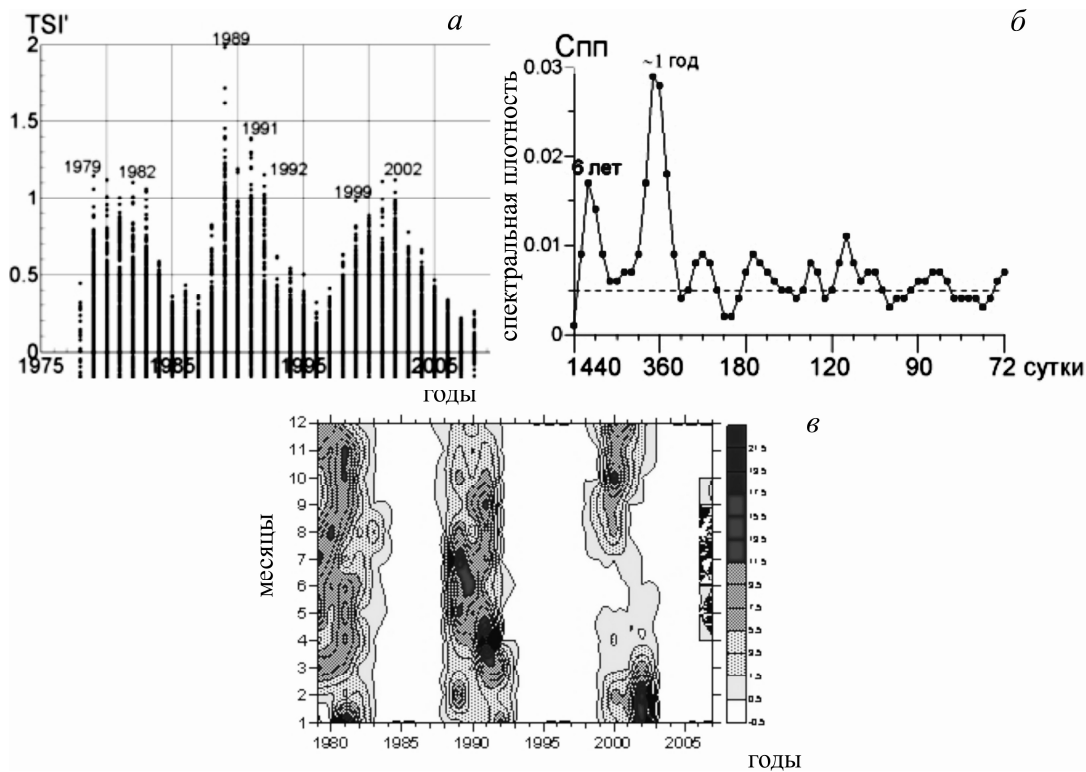


Рис. 1. Положительные аномалии ежедневных значений TSI ($\text{Вт}/\text{м}^2$) относительно среднего за 1979–2008 гг. (а); спектр ежедневных аномалий относительно 11-летнего цикла (штриховая линия – 95 % уровень значимости оценок спектральной плотности) (б); распределение по месяцам и годам числа больших положительных (выше 95 % уровня) аномалий среднемесячных значений TSI (в).

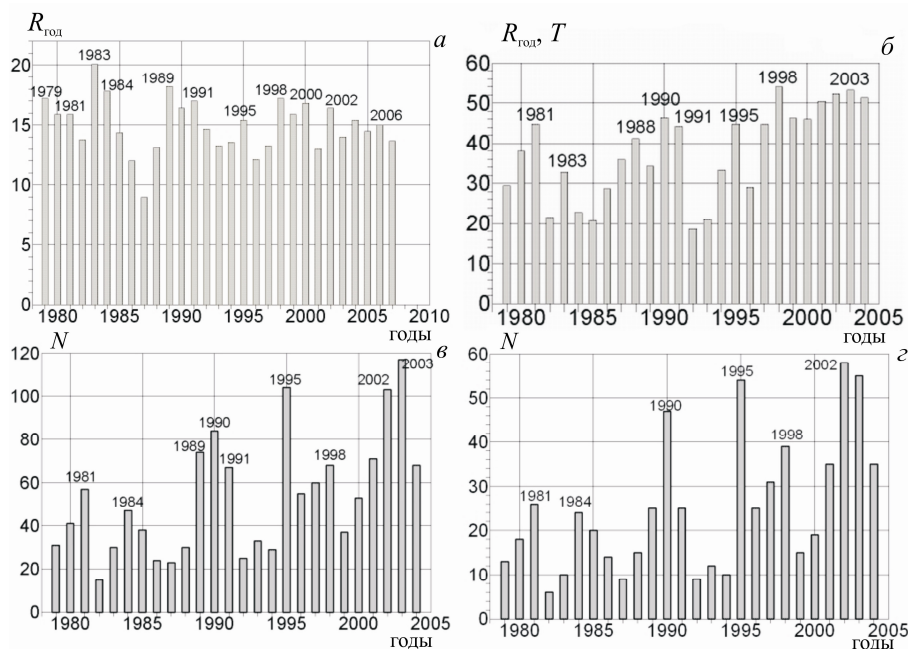


Рис. 2. Средний ранг ежедневных значений TSI за год (отклонения от 11-летнего цикла) (а); средний за год ранг среднемесячной средней температуры Северного полушария (б); число теплых месяцев за год на 81 станции в Северной полярной области (в); то же, но на 41 станции в морской Арктике (г).

$$P = \left(\frac{n_1 n_2}{N^2} \right)^k, \quad (2)$$

где N – годы, n_1 , n_2 – число максимумов в каждом ряду, k – число совпадений.

Несовпадение между максимумами индексов TSI и температуры воздуха приходится на период после

2004 г., когда температура во всех рассматриваемых областях повышалась, а TSI уменьшалось на минимуме 11-летнего цикла. Расхождение в последние годы можно отнести к реакции температуры на рост CO_2 , однако расчеты на глобальных моделях климата не показывают столь быстрый рост температуры воздуха в этот период при увеличении концентрации CO_2 .

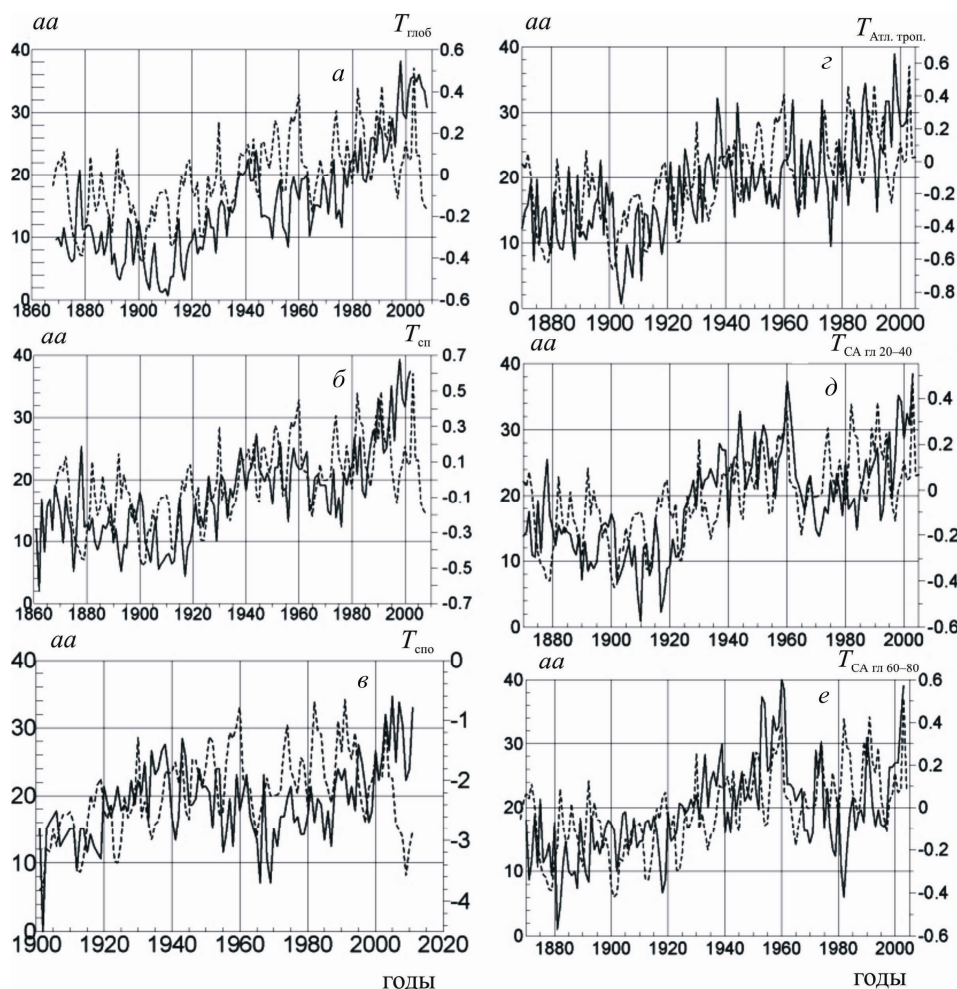


Рис. 3. Среднегодовые значения *aa*-индекса (штриховая линия) и температуры (сплошная линия). Средняя температура воздуха: средняя глобальная (*а*), средняя в Северном полушарии (*б*), в Северной полярной области (*в*); средняя температура воды на поверхности океана в Северной Атлантике: в области $10^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{N}$ (*з*), $20^{\circ}\text{N} - 40^{\circ}\text{N}$ (*д*), $60^{\circ}\text{N} - 80^{\circ}\text{N}$ (*е*).

Связь между изменениями геомагнитного *aa*-индекса и характеристик климата

Чтобы оценить влияние изменений СА на изменения климата на масштабах от десятилетий до столетий используются косвенные показатели СА, поскольку прямые спутниковые измерения радиации имеются только для последних 30 лет. В качестве таких показателей чаще всего используются числа Вольфа, а также планетарный *aa*-индекс геомагнитной активности, данные о которых имеются с 17 и 19 столетий соответственно.

В настоящей работе проведен анализ связи между изменениями *aa*-индекса и изменениями ПТВ и ТПО, осредненных глобально, по полушарию, по Северной полярной области (СПО), а также по районам Северной Атлантики. Оценки связи выполнены для рядов средних за год значений индекса и температуры и для рядов, сглаженных скользящим 11-летним осреднением. Соответствующие ряды средних за год значений показаны на рис. 3, а результаты расчетов корреляции между ними, а также между сглаженными рядами представлены в таблице.

Из рис. 3 следует определенное соответствие как между длительными тенденциями, так и короткопериодными колебаниями годовых значений *aa*-индекса, ПТВ и ТПО. Сходство между изменениями *aa*-индекса

и температуры воздуха в СПО нарушается после 2003 г. в результате резкого уменьшения *aa*-индекса, но отсутствия понижения температуры.

Расчеты взаимной корреляции между рядами среднегодовых значений *aa*-индекса, ПТВ и ТПО подтверждают значимую связь между ними, возрастающую после проведения скользящего 11-летнего осреднения (см. таблицу). Корреляция среднегодовых значений индекса и средней температуры для всех областей (за исключением СПО) показала максимальные коэффициенты в пределах 0.42–0.59 (при 95 % уровне значимости, соответствующем 0.20) при запаздывании изменений температуры относительно *aa*-индекса в пределах 2–14 лет. Такой разброс запаздываний объясняется присутствием во взаимнокорреляционной функции *aa*-индекса и температуры двух максимумов. Один из них отмечается на сдвиге 2–5 лет, а второй – 13–14 лет. В таблицу занесен сдвиг с наибольшим максимумом корреляции.

После 11-летнего скользящего осреднения коэффициенты корреляции резко возрастают для всех областей до 0.87–0.89 (для СПО – до 0.50), а запаздывание становится одинаковым для всех областей за исключением СПО. Учитывая, что после скользящего осреднения остается более 80 % межгодовой изменчивости средней за год температуры, можно заключить,

Максимальные коэффициенты корреляции (R_{\max}) между среднегодовыми и 11-летними значениями aa -индекса, приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры воды на поверхности океана (ТПО) и соответствующие запаздывания температуры (τ) за 1868–2003(8) гг. 95 % уровень значимости коэффициентов соответствует 0.20.

Область осреднения	aa и ПТВ				aa и ТПО			
	исходные		11-летние		исходные		11-летние	
	R_{\max}	τ , годы	R_{\max}	τ , годы	R_{\max}	τ , годы	R_{\max}	τ , годы
Глобус	0.58	14	0.87	8	0.59	13	0.88	8
Северное полушарие	0.58	5	0.87	8	0.58	5	0.89	8
Северная полярная область	0.21	2	0.50	2	–	–	–	–
Сев. Атл., тропики	–	–	–	–	0.57	5	0.88	3
Сев. Атл., 20–40° N	–	–	–	–	0.56	9	0.83	5
Сев. Атл., 60–80° N	–	–	–	–	0.43	7	0.69	2

что при коэффициенте 0.87 такая корреляция отражает 56 % изменчивости рассматриваемых характеристик ПТВ. При этом изменения температурных характеристик запаздывают относительно изменений aa -индекса в среднем на 8 лет. Корреляция между aa -индексом и аномалиями средней ТПО в Северном полушарии и в экваториальной области при сглаживании 11-летним скользящим осреднением также высока, но часть отражаемой этой корреляцией изменчивости ТПО меньше. Но и в этом случае вследствие высокой корреляции часть отражаемой рассматриваемой связью межгодовой изменчивости ТПО составляет не менее 40 %.

Выводы

Из сравнения флуктуаций СА и ПТВ установлено, что самые теплые периоды в Северном полушарии в значительной части (до 80 % от общего числа сравнений) приходятся на годы с максимальными положительными суточными аномалиями TSI. В высоких широтах Северного полушария наибольшее число теплых месяцев также отмечено в годы, когда наблюдались большие положительные аномалии TSI (совпадения составляют более 70 % от числа сравнений).

Между рядами среднегодовых значений aa -индекса, ПТВ и ТПО, осредненными глобально и по полушарию, существует корреляция с коэффициентами в пределах 0.49–0.59 (при 95 % уровне значимости, соответствующем 0.20) и с запаздыванием изменений температуры относительно aa -индекса в пределах 3–14 лет. После сглаживания скользящим 11-летним осреднением коэффициенты корреляции между рядами aa -индекса и температуры возрастают до 0.87–0.89, а запаздывание составляет 8 лет.

Учитывая, что после скользящего осреднения остается более 80 % межгодовой изменчивости средней за год ПТВ, при коэффициенте корреляции в пределах 0.87–0.89 установленная связь отражает более половины изменчивости рассматриваемых характеристик ПТВ. Доля изменчивости ТПО, отражаемая связью с aa -индексом, составляет около 40 %.

Принимая во внимание запаздывание ПТВ и ТПО относительно изменений aa -индекса при высокой корреляции между ними, можно заключить, что установленные зависимости могут объяснять значительную часть изменений средних ПТВ и ТПО.

Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ 09-05-00232а и в рамках выполнения государственного контракта № 16.420.12.0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Cubbish U., Eduardo Zorita E., Kaspar F., et al. Simulation of the role of solar and orbital forcing on climate // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 1629–1634.
- Gray et al. Solar influences on climate // *Rev. Geophys.* 2010. V. 48. RG4001. doi:10.1029/2009RG000282.
- IPCC 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 p.
- Lean J. L., de Land M. How does the Sun's spectrum vary? // *J. Climate.* 2012. V. 25. P. 2555–2560.
- Love J.J., Mursula K., Tsai V.C., Perkins D.M. Are secular correlations between sunspots, geomagnetic activity, and global temperature significant? // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L21703. doi:10.1029/2011GL049380.
- Lovejoy S., Schertzer D. Stochastic and scaling climate sensitivities: Solar, volcanic and orbital forcings // *Ibid.* 2012. V. 39. L11702. doi:10.1029/2012GL051871.
- Scafetta N., West B.J. Phenomenological solar contribution to the 1900–2000 global surface warming // *Ibid.* 2006. V. 33. L05708. doi:10.1029/2005GL025539.
- Soon W. Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations in the Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years // *Ibid.* 2005. V. 32. L16712. doi:10.1029/2005GL023429.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия